

표면부착형 영구자석 초고속 전동기의 설계 특성 및 실험

송재홍, 변지섭, 남혁*, 홍정표*
 삼성테크윈(주), 창원대학교 전기공학과*

Design Characteristic and Experiment of Super High Speed Motor for Surface Mounted Permanent Magnet

Jae-Hong Song, Ji-Sub Byeon, Hyuk Nam*, Jung-Pyo Hong*
 SamsungTechwin PowerSystem R & D Center
 Dept. of Electrical Engineering of Changwon National University*

Abstract - Super high speed motors and generators are increasing in various applications such as air compressor, gas turbine and fuel cell systems because of small size and light weight at the same power level. This paper presents an experiment and simulation for a permanent magnet synchronous motor(PMSM) in super high speed applications.

1. 서 론

표면부착형 영구자석 초고속 전동기 (50,000rpm 이상)는 로터 표면에 영구자석을 부착하여 고효율, 소형, 경량, 고속 및 고출력을 얻을 수 있는 기술로 산업이 고도화, 선진화됨에 따라 필수적인 기술이다 [1,4,7]. 초고속 전동기는 전자기적인 설계와 기계, 구조적인 설계를 위한 요소기술이 중요하며 이 요소기술로는 초고속 전동기 구동을 위한 인버터의 설계 및 구동방법, 초고속 회전체의 지지를 위한 AFB(Air Foil Bearing)의 설계, 로터의 축 진동 특성을 고려한 로터의 Dynamics 해석, 영구자석의 비산방지를 위한 슬리브(Sleeve)의 구조해석, 시스템의 냉각을 위한 열전달 해석이 동시에 수행되어야 한다.

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 초고속 전동기의 요소기술 설계 및 특성에 대하여 알아보고 11kW, 90,000rpm, 2극의 초고속 전동기 시스템의 실험 결과에 대하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 초고속 전동기의 설계 특성

2.1.1 초고속 전동기 기본설계

시스템에 적용되는 초고속 전동기의 형상과 기본설계 과정을 각각 그림 1, 그림 2에 나타내었다. 초고속 전동기의 출력과 속도를 결정하기 위해서는 압축기의 유량과 압력으로 출력을 계산하고, 압축기의 기계손실을 포함하여 압축기의 효율을 최대로 설계할 수 있는 속도를 결정한다. 압축기의 출력 및 속도가 결정되면 전동기의 출력 및 속도가 결정되어 지므로 AFB, 로터구조, 로터 Dynamics 설계 및 해석을 수행하게 된다.

로터 하중, 축, 직경, 하중, 속도 등을 고려하여 AFB를 설계하고, 슬리브/영구자석의 변위 및 응력, 로터 직경을 고려하여 로터 구조 설계, 해석을 하게 된다.

로터 Dynamics 해석은 위험속도(Critical Speed)에 대한 약 30%이상의 로터 회전안정성을 확보하기 위한 축방향 길이를 일차적으로 결정한 후 전동기의 상세 설계를 시작한다.

열 해석 및 전동기의 구동 시뮬레이션에 대한 과정은 전동기의 상세 설계와 동시에 해석된다 [3,4].

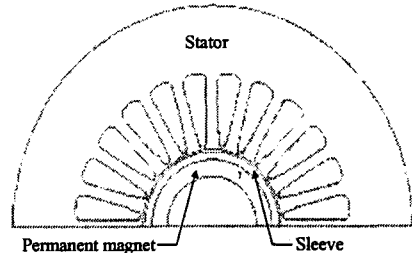


그림 1 초고속 전동기 (11kw, 90krpm)

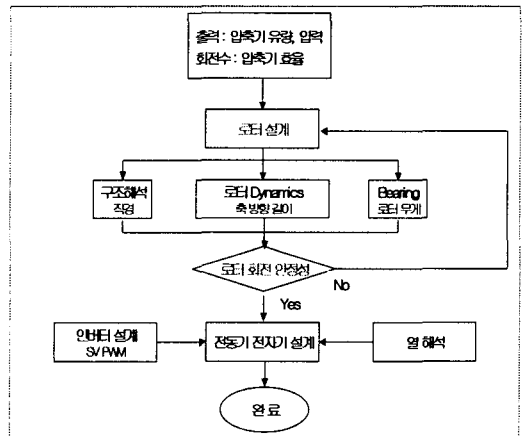


그림 2 초고속 전동기의 기본설계 과정

2.1.2 영구자석 특성

초고속 전동기 설계 시 영구자석을 선정할 때에는 사용 환경에 대한 영구자석의 온도 특성과 밀도, 항복강도, 탄성계수와 같은 기계적 특성에 주의해야 한다. 표 1은 회도류계의 영구자석(NdFeE, Sm₂Co₁₇)특징에 대해 자기적, 기계/구조적인 관점에서 비교하고 있다. 로터는 원심력에 의해 구조적으로 더 취약해진다. 원심력은 반경, 밀도와 속도의 함수인데, 반경과 속도가 동일하다고 가정하면 밀도가 원심력에 가장 큰 영향을 준다. 즉 밀도는 원심력에 선형 비례하므로 밀도가 큰 Sm₂Co₁₇가 더 큰 원심력을 발생시키게 된다. 그리고 그 응력(물체가 외부 힘의 작용에 저항하여 원형을 지키려는 힘)을 견딜 수 있는 항복강도(소재강도)도 Sm₂Co₁₇가 더 작기 때문에 구조적으로는 NdFeE가 더 좋은 특성을 갖는다. 따라서 초고속 회전체에 적합한 영구자석의 항복강도와 탄성계수는 큰 것이 좋고, 밀도는 작은 것이 좋다.

표 1 영구자석 특성 비교

| 특 성 | NdFeB HS-35CH | SmCo ₁₇ H-30CH | 단위 | 장점, 단점 |
|------|------------------|------------------------------|----------------------|--------------------|
| 자속밀도 | 11.8~12.8 | 10.4~11.4 | kG | NdFeB이 고에너지밀도보유 |
| 보자력 | 11.0~12.6 | 8.0~10.0 | kOe | |
| 온도계수 | -0.12 | -0.03 | [%/°C] | SmCo계열이 고온에 유리 |
| 동작점 | 150 | 300 | [°C] | |
| 임계온도 | 310 | 770 | [°C] | |
| 밀도 | 7.5 | 8.4 | [g/cm ³] | NdFeB 유리 |
| 항복강도 | 78.4 | 39.2 | [MPa] | NdFeB 유리 |
| 탄성계수 | 157 | 108 | [GPa] | NdFeB 유리 |
| 도전율 | 6.67E+05 | 1.25E+06 | [S/m] | NdFeB 유리 |

2.1.3. 로터 구조

로터 형상 설계 시 영구자석을 사용하기 때문에 초고속 회전시 비산방지를 막을 수 있는 지지물(Sleeve)이 필수적이다. 지지물의 소재로는 가격과 강도, 회전속도를 고려하면 일반적으로 Inconel 718을 가장 많이 사용한다. 로터는 축에 대한 초고속에서의 기계적인 강성을 고려하기 위하여 Solid형태로 사용한다.[1,6]

로터의 구조 안정성 확인, 영구자석 및 슬리브의 제작 및 조립 조건 등의 가능성 판단을 위하여 영구자석과 슬리브의 소재강도를 고려한 구조해석을 수행한다.

로터의 회전력에 대한 비례식은 식(1)과 같고 두꺼운 원통에 생기는 응력은 그림 3에 나타내었다.

$$F = r \rho w^2 \tag{1}$$

여기서, r 은 반경 [m], ρ 는 소재의 밀도 [kg/mm^3], w 는 각속도 [rad/sec]를 나타낸다.

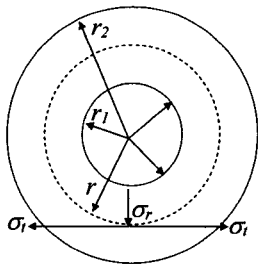


그림 3 후우프 응력, σ_t

- P : 내압 [Pz], r : 임의의 점의 반경 [m]
- r_1, r_2 : 내, 외벽의 반경 [m]
- σ_t : 반경 r 에 생기는 후우프 응력 [Pz]
- σ_r : 반경 r 에 생기는 반경방향 응력 [Pz]

2.1.4 로터 손실 특성

슬롯 리플에 의한 공간고조파의 영향으로 슬롯 리플의 크기 및 속도의 제곱에 비례하여 슬리브에서 로터 손실이 발생한다. 슬리브의 도전율이 작고, 자기적인 공극 길이를 증가시켜 공극에서의 자속밀도를 감소시키며 슬롯수를 많게 하거나 슬롯 개구폭을 작게 설계하면 로터 손실을 줄일 수 있다 [6,8,9] 식 (2)는 로터 손실을 나타내는 식이다.

$$W_e = \frac{\pi^3}{1800 \rho} (B_0 N)^2 D^3 l d \tag{2}$$

- B_0 : 슬롯리플에 의한 자속밀도의 크기 [T]
- N : 회전속도 [rpm], D : 회전자 평균 직경 [m]
- l : 유효 길이 [m], d : 두께 [m], ρ : 도전율 [Ωm]

2.1.5 AFB (Air Foil Bearing)

AFB는 Radial 베어링과 Axial 베어링으로 구성되어 있으며 초고속 회전기의 전방과 후방에 각각 장착되어 있다 [1,4]. 초기 구동시의 마찰을 줄이고, 베어링의 윤활 역할을 위해 포일에 코팅을 하며 포일의 두께는 0.08mm에서 0.2mm까지 로터 하중 등 설계 조건들을 고려하여 결정하고, 재질로는 강도가 좋고 고속용에 적합한 Inconel 계열을 많이 사용한다.[1],[4]

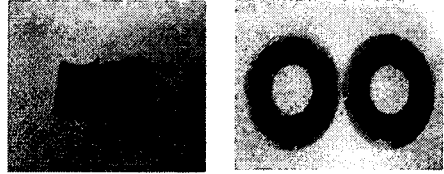


그림 4. Radial(좌)과 Axial(우) Bearing

2.1.6 로터 Dynamics

로터 속도 곡선과 고유진동수 곡선이 만나는 지점이 위험속도이다. 정격 운전 범위를 위험속도 이내로 제한하여 설계하는 것이 가장 좋으며 로터 직경을 크게 하거나 축 방향 길이를 짧게 하면 위험속도에 대한 정격속도 margin을 기존보다 더 확보할 수 있다.[4] 고유진동수를 간단하게 수식으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

여기서, k 는 강성, m 은 무게를 나타낸다.

2.1.7 구동 인버터

공간벡터 전압변조에 의한 전압변조방식이 직류단 전압에서 가장 큰 교류 전압을 얻을 수 있고, 출력 상전류의 고조파 함유율에서 타 변조방식에 비해 우수하다고 알려져 있다.[2] 실제 전동기 제어시 사용되는 벡터도는 그림 5와 같다. 최대 토크 발생을 위해 q 축 전류만 인가하여 구동하며 최대 발생 토크는 식 (4)와 같다.

$$T = \frac{3}{2} p EI q [Nm] \tag{4}$$

- I_d, I_q : d, q 축 전류, V_d, V_q : d, q 축 전압
- V, I : 상전압 및 상전류, E : 역기전력
- R, X_s : 저항 및 동기리액턴스

2.2 초고속 전동기의 특성 해석

2.2.1 로터 손실 해석

그림 6은 3상 정현파 전류를 구동 입력으로 하고 속도 60,000rpm, 90,000rpm과 인가전류 0.2A, 12A, 54A, 70A, 90A에 대한 로터 손실의 변화특성을 나타낸 것이다. 슬롯 리플, 두께, 길이, 저항률이 일정할 때 속도변화의 제곱에 비례하여 로터손실이 크게 변화함을 알 수 있다.

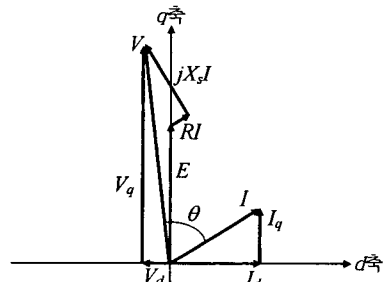


그림 5 표면부착형 영구자석 초고속 전동기 벡터도

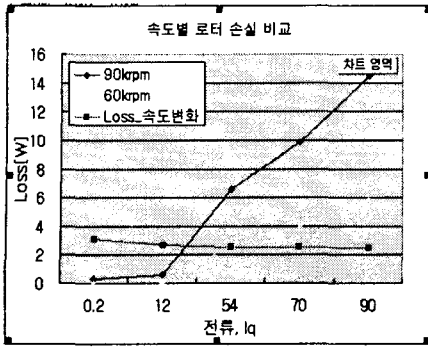


그림 6. 로터 손실

2.2.2 역기전력 해석

영구자석의 잔류자속밀도 및 두께가 각각 1.23[T], 3.25[mm], 회전속도가 90,000rpm일 때, 역기전력 상수가 0.00745 [V.s/rad]로 나타났다.

2.2.3 로터 구조 해석

90,000rpm의 정상상태에서 후우프 응력이 약 120MPa(소재강도 800MPa)로 매우 안정적이지만 영구자석은 약 80MPa로 소재강도(70MPa)를 초과하여 구조적으로 매우 불안정하였다. 따라서, 영구자석의 구조안정성을 확보하기 위하여 슬리브와 영구자석간에는 억지끼움이 요구된다. 만약 슬리브/영구자석을 편심으로 약 0.02mm의 억지끼움으로 조립할 경우, 정상상태에서 슬리브의 후우프 응력은 약 200MPa로 증가하지만 영구자석의 응력은 약 55MPa로 낮출 수 있어 슬리브와 영구자석 모두 안정함을 알 수 있다.

2.2.4 로터 Dynamics 해석

로터 Dynamics 해석 결과, 10,000rpm과 110,000rpm 부근에서 고유진동수와 로터 속도 곡선이 만나고 있으므로, 실제 운전 시 10,000rpm 지점을 빨리 지나고 110,000rpm 이내에서 운전해야만 초고속 회전기의 충분한 회전 안정성을 확보할 수가 있다.

2.2.5 구동 시뮬레이션

그림 7은 전동기 상수를 통해 무부하시의 속도, 전류 시뮬레이션에 대한 결과와 속도, 파워 시뮬레이션에 대한 결과이다. 해석결과속도는 정격대비 56%, 파워는 45%의 여유가 있음을 알 수 있다.

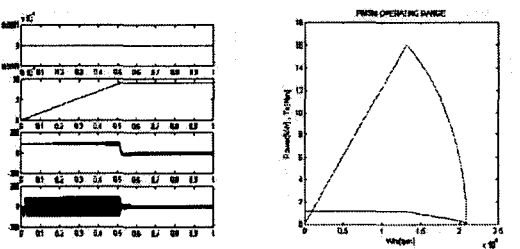


그림 7 무부하 시뮬레이션

2.3. 초고속 전동기 실험 결과

2.3.1 역기전력 측정 및 무부하시 전류

그림 8은 역기전력 측정 파형으로서 46,860 rpm에서 역기전력 상수는 0.00755 [V.s/rad]로 나타났다.

그림 9는 회전자 양 끝단에 임펠러를 장착하고 무부하 구동 시, 전동기 입력 전류 측정 결과이다. 100krpm에서의 무부하 전류는 약 10.8A 측정되었으며 이는 초고속에서의 철손과 풍손으로 판단된다.

2.3.2 부하시의 전압, 전류 측정

그림 10은 부하전류 54A, 회전속도 72krpm에서의 상전류 파형과 q축 전류파형이다.

그림 11에서 d축의 인가 전압이 고속으로 갈수록 리액턴스 성분에 의해 q축의 인가전압보다 더 빨리 커지고 있음을 알 수 있다.

그림 12와 그림 13은 각각 q축 전류만 인가하여 부하시의 전류 대 토크 곡선, 속도에 따른 입력, 출력, 효율을 나타낸 것이다.

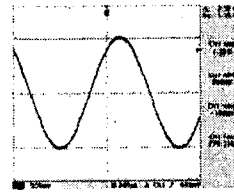


그림 8 역기전력

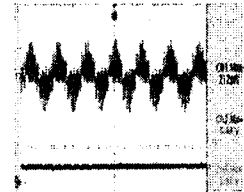


그림 9 무부하 전류

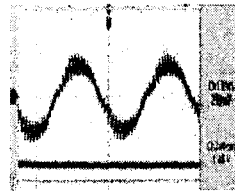


그림 10 부하전류

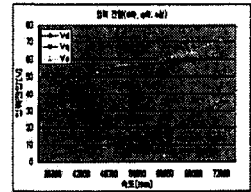


그림 11 입력전압

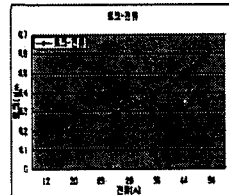


그림 12 전류 대 토크

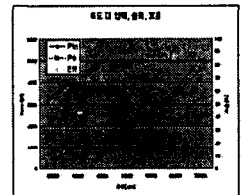


그림 13 출력, 효율

3. 결론

초고속 전동기의 설계특성, 해석과 72,000rpm까지의 실험적 특성에 대해 알아보았고 AFB, 로터의 슬리브와 영구자석의 응력, 로터 Dynamics 등을 확인하였다. 전동기 상수를 통한 속도, 출력 시뮬레이션과 실제 부하 실험을 통해 실험적 특성에 대해 살펴보았다. 향후 손실 분석을 통한 초고속 전동기의 효율을 증가시키기 위한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] 한국전기연구원, 초고속 회전기 설계이론, 2002
- [2] 설승기, "전기기기 제어론"
- [3] 송재홍, 차영범, 양현섭, 이정중, 홍정표, "표면부착형 영구자석 초고속 회전기의 설계" 2003년 하계학술대회 KIEE
- [4] 송재홍, 표면부착형 영구자석 초고속 전동기의 특성 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 2003. 12
- [5] TJE Miller, "Design of brushless pm metors"
- [6] J.F.Gieras, M.Wing, "Permanent magnet motor technology", Marcel Dkker, Inc., New York, 1997
- [7] Longya Xu et al., "Implementation and experimental investigation of sensorless control schemes for PMSM in super high variable speed operation"
- [8] Takahashi et a3., "A Super high speed PM motor drive system by a quasi current source inverter"
- [9] Mouboub Mekhiche et a2., "High speed motor drive development for industrial application"